DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.1992.04.005

广州珠江沉管隧道的设计与施工

黎宝松

(广州市市政管理局)

一、工程概况

珠江隧道工程是“七五”期间广州市的重点市政交通建设项目，即将动工的广州市地下铁道第一期芳村至广州东站线亦在此越江。

珠江隧道在广州市西南的白鹅潭西穿越。它的北起端自沙面岛西侧的沙基涌口，接市区内环线黄沙大道及六二三高架路，南至芳村区上涌口，与同步兴建的芳村花地大道三层立交桥相接。延伸向南接通往珠江三角洲明星城市南海、中山的专用一级公路。它是由广州市中心区进入芳村区的又一重要而便捷的交通通道。隧址沉埋处的河床复盖层很浅，其下面是红砂岩，该处珠江江面宽约450m。见图1珠江隧道位置图。

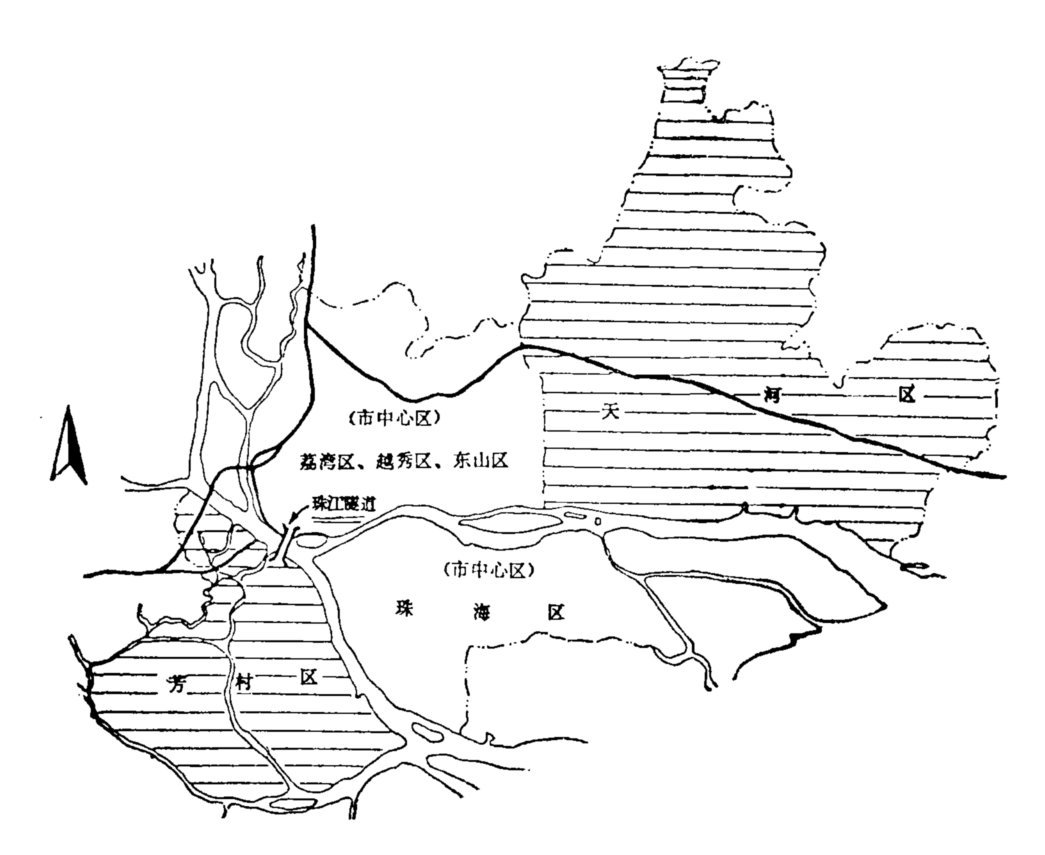


图1　珠江隧道位置图

珠江水下隧道于1988年底开工，目前已进入全面施工阶段。它是我国大陆在建的第一条采用沉管法（Jmmerssed Tunel）设计施工的大型水下隧道。

本隧道是供汽车交通与地铁交通合用的三孔隧道——西侧两孔各为双车道隧管，行

驶汽车，东侧一孔内布置双股道快速轨道，供地铁车辆行驶。

全隧道由北岸黄沙段、河中段以及南岸芳村段三部份组成。汽车隧管的总建筑长度为1238.5m，目前同步施工的地铁隧管长度也在1200m左右。

在1238.5m长的汽车隧管中，河中段部分长 457m，分五节采用沉管法施工；北岸黄沙段长427m，包括191.5m 的敞开引道段——U型钢筋砼抗浮结构和 235.5m 的暗埋段——箱型钢筋砼结构；南岸芳村段长3545.5m，包括326m的U型敞开段和28.5m的箱型暗埋段。两岸的敞开段与暗埋段之间根据两端口部不同的亮度，分别设置长度不等的遮光栅构造，满足隧道进口部区段亮度调节的需要。

珠江隧道是通过贷款建设的，因此实行行车收费。并根据地形，集中在南岸芳村一侧集的敞开段外设收费广场，布置13条行车道和14个收费亭，对通过隧道的汽车实施双向收费。隧道的运营管理机构和隧道的交通、设备、收费、监控大楼设在南出口收费广场的西侧。隧道平面示意图如图2所示。

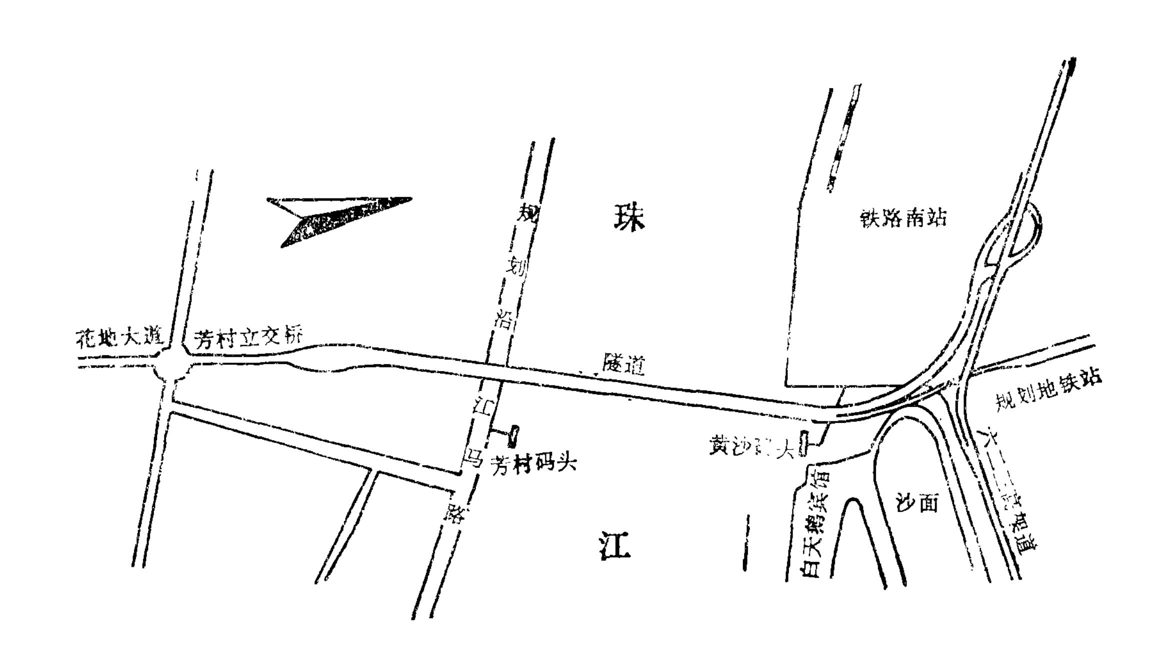


图2　珠江隧道平面示意图

二、珠江隧道的主要设计技术标准

1.结构设计主要标准

汽车荷载：汽车——超20　设计；

　　　　　挂车——120　验算；

地铁荷载：八节大容量车厢编组；

地震：按7度设防；

设计水位：按百年一遇洪水位（7.50m）计算。

2.几何设计的主要标准

汽车隧管的通行净高限制为 4.5m，通行限界详见图3；

地铁隧管的通行限界见图4。

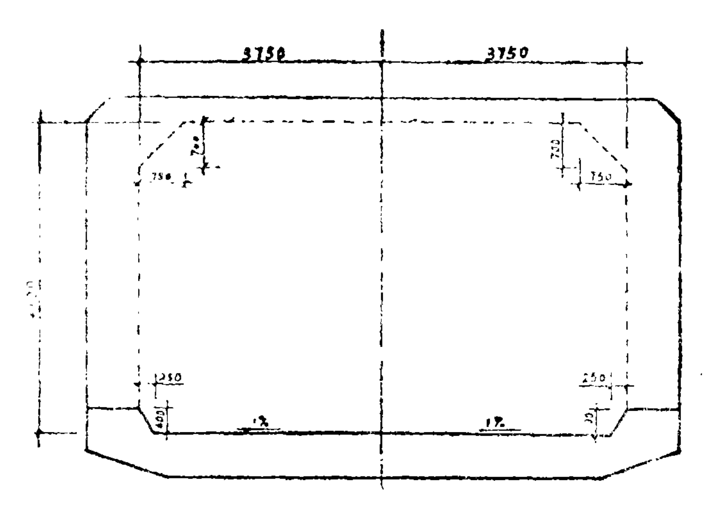


图3　汽车隧管通行限界图

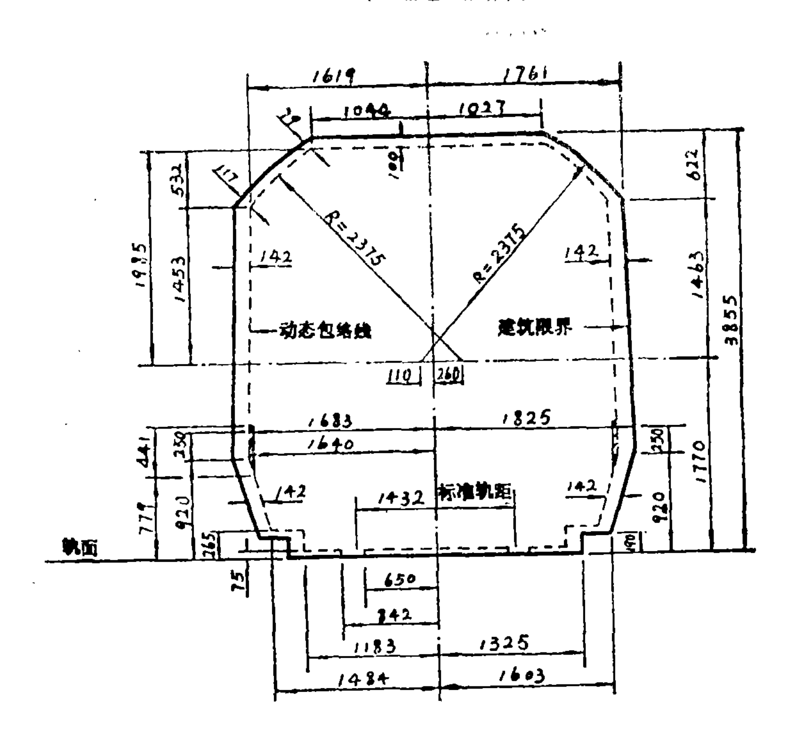


图4　地铁隧管通行限界图

在珠江主航道河床下，隧道主体结构的外顶面标高不高于－4.50m，即以通航水位标高3.79m为基准，隧管埋深的深度大于8.29m。（注：本文所提的标高值均按广州市城建标高计）

汽车隧管箱形结构范围(亦即暗埋范围)内的最大纵坡为3.8%，路面最低点标高为－11.18m米；最小竖曲线半径为1200m；敞开段（U型结构及挡土墙结构）范围内的最大纵坡为4.5%。

地铁隧管的最大纵坡为3%，最小竖曲线半径为3000m。

汽车隧管内的设计车速不高于50km/h，一般情况下亦要求不低于15km/h。每个车

道设计交通量为900辆/h（全断面为四车道）

3.通风设计的技术标准

汽车隧管内的一氧化碳浓度，一般状态下不大于 100ppm；交通堵塞时要求不高于 200ppm，持续时间为15分钟。

柴油烟雾允许浓度 $K=7.5\times10^{-3}/m$；在正常交通时烟雾浓度 100m 的透过率为 48%（路面平均照度按132勒克斯计）。

隧管内风速不超过10m/sec。

4.照明设计标准

参照国际照明委员会（CIE）“公路隧道及地下通道照明指南”。

汽车隧管照明按分段要求设置，基本段白天照度不小于 110 勒克司，夜间减半，隧道内路面亮度采用2尼脱；照明方式为连续光带式。

三，隧道的特点

1.是汽车与地铁快速车辆分管共用的水下隧道，隧道主体结构最宽的区段为 33m。

2.隧道的河中区段按沉管法设计与施工。

沉管法就是——首先选择合适地址建造干坞，在干坞内分段预制沉管隧管钢筋砼结构，然后分段浮运拖航至河（海）中隧道位置，借助水面吊船系统装置，将分段管节准确地沉放于设计位置，利用水压对接将作业的节段与先前已就位的节段拼装成连续结构，节段间的接头由特制的GINA 橡胶垫和Omega橡胶密封圈组成内外两道止水带，形成柔性接头。

3.珠江水下隧道汽车隧管内还配备有较完善的交通及通风、排水，照明、闭路电视、消防、电话、广播等监测控制、营运管理系统，以确保隧道交通的安全畅通和较高效率的服务水平。

四、干坞的设计与施工

作为河中沉管钢筋砼节段预制场地的干坞设在江南岸的芳村，沿隧道轴线布置，宽48m，长 150 余米，布置坞门的坞口口部宽度缩至36m，由空心隔舱式钢结构坞门搁置于砼坞坎上，以橡胶止水带贴住底部坞坎竖墙及两侧坞墩墙体，利用江水水头压紧橡胶止水带形成良好的档水效果。

干坞内每次一般预制一节沉管管段。需要在干坞内预制的沉管段共5节，其中两节120m长，一节105m长，一节90m 长以及一节22m长，宽度均为33m，高度均为7.95m；90m和22m 长的两节沉管安排在最后一次同时预制浇筑。

干坞坞底标高为 - 3.50m（距地面约 12m），两侧均以加有斜锚杆、嵌入岩层的地下连续墙进行支护；钢筋砼地下连续墙厚80cm，斜锚杆分别采用Φ36和Φ40 的Ⅲ级钢筋，长度为 9～29m，在连续墙高度方向布置2～4排（干坞坞门外一段连续墙较深，斜锚杆为5排），排距为2m，水平间距为1～2m。

地下连续墙嵌入砂岩，基坑内机械化挖土，干坞底部的基岩用密集小剂量炸药爆破开挖。

干坞坞底用碎石铺成，便于预制管节容易起浮。第一节（105m长）沉管浮出坞时就很成功。

五、岸上段的设计与施工

1.黄沙岸（北岸）暗埋段的隧管结构在开挖基坑内就地现浇。此基坑近河边一段（亦称前暗埋段，此段的隧管结构为汽车、地铁合管的断面）由地下连续墙加钢支撑支护，另一段（亦称后暗埋段，此段地铁隧管面与汽车隧管分叉离开，分别形成两个箱形结构）一侧由带斜锚杆的连续排桩墙支护、另一侧自然放坡。

暗埋段隧管为C25 钢筋砼箱形结构，抗渗标号B6级；开敞段为U 形 C25 钢筋砼结构，因要保护附近的道路和高架路基础，有

部分基坑支护采用加斜锚杆的钢板桩，U形结构的底板布置有35×35cm，长5.5～11m不等，间距1.5～2m的钢筋砼桩，穿过砂层支承于中风化岩层内。

黄沙岸暗埋段目前已施工完成了8段，每节长度18～19m。由于竖持采用砼二级配，采用低的水泥用量（270～280kg/m³），砼浇筑温度控制在28°C，掺加适量粉煤灰；在侧墙内布置水管通冷水降低砼的水化热等的措施，基本上避免了侧墙及顶板砼早期产生的贯穿性裂缝。

2.芳村岸的隧管暗埋段及部分开敞段分别是在原来的干坞内就地浇筑的钢筋砼箱形结构和U形结构，标号同样是C25，抗渗标号也是B6。根据黄沙岸的经验，芳村岸的暗埋段及开敞段结构砼的外防水层也将取消。

六、河中段（沉管）的设计与施工

珠江隧道河中段长457m，分成五节段，从北面的黄沙岸向南面的芳村方向依次编为E_1、E_2、E_3、E_4、E_5。

E_1节段长105m，与黄沙岸暗埋段口部相接；E_2和E_3均长120m，E_4长90m，E_5仅长22m，伸入南岸原干坞的坞坎里面，以现浇砼与坞墩墙连接后，并在其上建好堤岸后，再抽干坞内水（将E_5与E_4对接时，坞内水位与江面齐平），然后接着E_5管节浇筑芳村岸的暗埋段结构。

E_1～E_5五个节段分四次在干坞内预制（E_4与E_5两节一次预制），并分别浮运出坞进行沉放对接。沉管砼为56天龄期C30，抗渗58。

管节的浮运沉放作业要利用平潮时间进行，尽量避免较大流速的不利影响，要求精心慎密地组织每一步的施工，并且要在较短的时间内完成每一节沉管的拖运、沉放就位和对接工作。

E_1～E_4节段沉放作业时的负浮力取为200～300t，E_5节段沉放作业时的负浮力取为50t。

设计采用每节段沉管底板四支点（垂直千斤顶支承）调节及顶板前端加定位杆定位的沉放就位方法。

每节段沉管沉入基槽对接就位后，即在管内预置的水箱充水1400～1500t负浮力，由四个支承千斤顶调节好管底与河床基槽之间空隙为60cm，然后通过在管内底板上预留的带有水压力阀的灌砂孔以“砂流法”（Sand Flow Method）灌填中粗砂，进行沉管底部的基础处理。为掌握“砂流法”的设计施工工艺，由珠江隧道实业有限公司委托交通部第四航务工程局科研所在大比例的钢筋砼模拟管底状态下进行了“砂流法”注砂的工艺试验及有关设计、工艺参数的测定，并完成了试验报告。

河中段沉管结构及两岸暗埋段（汽车与地铁合管）的一部分隧管结构的典型横断面

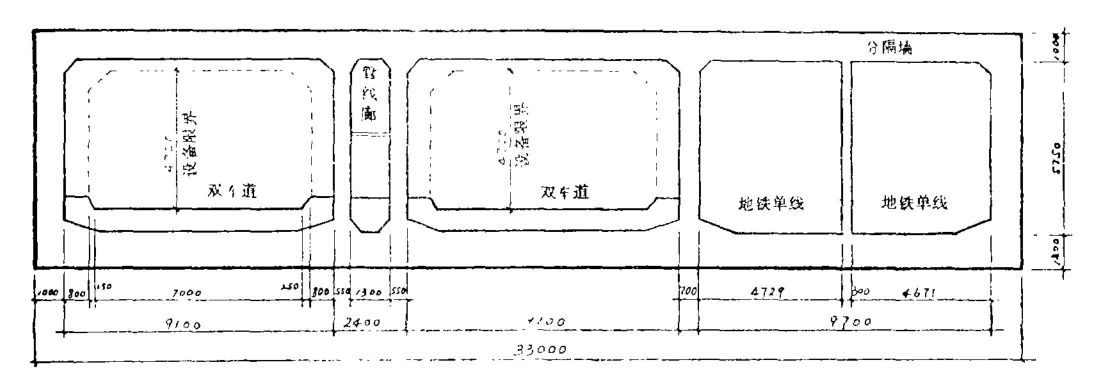


图5 隧管横断面

如图5所示。 两岸汽车隧管与地铁隧管分叉后，则分别为双箱形结构及单箱形结构。

沉管结构以及两岸的暗埋段和敞开段的隧道结构的砼采用了双掺技术——掺加适量粉煤灰和减水剂。

对沉管结构及暗埋段隧管结构的大体积及分次浇筑砼、因水泥水化热及砼收缩等导致砼结构早期开裂的问题，在设计与施工中得到了注意，实践中亦得到了初步的解决，以沉管预制为例，从 E_2 管节开始，采取了下述措施：

(1) 将分段砼浇筑长度缩短至 16m 左右，每分段间留1.4m宽的后浇带。

(2) 尽量采用低水化热水泥，每m^3砼用量要求控制在300kg以下，标准用灰量(包括掺加的粉煤灰)控制在 350kg 以下，水灰比0.5左右(考虑用泵送砼)，粗骨料用二级配。

(3) 搅拌砼时加入适当冰水，使砼浇筑温度保持在 28°C 以下；在每分段结构的两外侧墙内预埋冷却水管，侧墙浇筑砼时通一般稍冷的自来水或江中深层抽上来的水，连续通水8～10天。

(4) 由于施工条件所限，顶板砼未能与侧墙砼同时一次浇完，但要求顶板砼的浇筑应在侧墙砼浇筑完成后六天内完成。

(5) 由于后浇带(宽1.4m) 的“约束”效果较好， 为使后浇带部分砼的收缩得到补偿，要求在后浇带的砼配比中加入适量的膨胀剂；后浇带砼的浇筑时间一般要求在两侧分段砼浇筑28天后进行。

珠江水下隧道的E_2沉管，长120m，分七段(每段长16m 左右) 浇筑混凝土，6条后浇带；从1992年5月开始至同年7月下旬，完成了主体结构砼的预制，凡是按上述措施执行的区段，沉管结构的侧墙、顶板都没有再出现早期裂缝。

特别是在侧墙布置冷却水管的措施效果显著：施工单位要求在一段沉管的两侧墙做对比试验：其它措施都相同，唯一侧布置冷却水管，另侧无，结果是，拆模后在不布置冷却水管的侧墙内外出现裂缝，而布有冷却水管的侧墙则无裂缝出现。根据预埋于砼内的测温元件测得砼浇筑过程中的温升曲线也明显地反映出布置了冷却水管部分的最高温升为 50.5～53°C，10天内的温升曲线也比较低缓；而未布置冷却水管部分测得的最高温升为57°C，10 天内的温升曲线也比较高耸一些。

岸上暗埋段隧管结构砼工艺也坚持采用了上述五项措施，砼早期防裂的效果比较显著。通过黄沙岸暗埋段结构80m区段的实践以后，已决定取消原定在底板、侧墙和顶板外周边设置的防水层。

为确保沉管管节砼的防渗功能，沉管结构砼预制前， 在沉管底部及两外侧墙下部1.7m高度范围铺、“贴”6mm厚的防渗钢板，它们也就作为底板浇砼的外模板；外侧墙其余部分及顶板则在砼预制完毕后，在表面涂抹 2mm 厚的弹性聚胺酯防水层。为保护侧墙防水层在沉管浮运、沉放过程中不至碰擦破坏，在弹性聚胺酯防水层上面再抹粉 1.5cm厚的水泥砂浆。

珠江隧道是在潮汐河流上用沉管法设计施工的水下隧道，对预制沉管构件尺寸、砼容重、现场水体浮力等参数的控制要求比较严格。 管节的稳定抗浮系数在下沉阶段为1.01 (负浮力 200～300t 时)，施工阶段为1.05，营运阶段为1.1。

沉管各管节须在水下(还有一定的流速)就位准确并对接连成一体，因此在沉放就位的施工作业中，精度要求很高。可以说，沉管隧道成功的关键更有赖于高水平的施工作业。

珠江隧道沉管沉放对接方案已初步拟定采用大型吊船沉放法，将由交通部广州救助打捞局负责施工。

沉管沉放施工工艺的主要步骤是：①将预制管节从干坞浮出，准确地拖航到位；②

利用平潮期间，稳定准确地将作业管节沉入已挖好的河床沟槽内的预定位置；③将作业管节准确地与前段已就位的管节定位拉合(可利用前述的位于顶板前端的两根定位杆)，使GINA橡胶垫在初始拉合力(一般采50t用左右)下在两管节接头中形成有效的初始水密环；④适时进行水压对接，压紧GINA橡胶垫，使接头形成设计所要求的强大水密圈，打通接头两侧的端封，就可在接头内侧安装Omega密封圈，从而形成接头上的第二道止水防线；⑤对就位后支承于四点（垂直千斤顶）的沉管管节下面的空隙(60cm)以砂流法灌砂进行基础处理，使隧道结构均匀地支承于一个基础平面上；⑥在管内拆除四个垂直千斤顶但留下四根支杆，千斤顶可重复使用，但需再配支杆。

图6示出了珠江隧道纵剖面的示意。

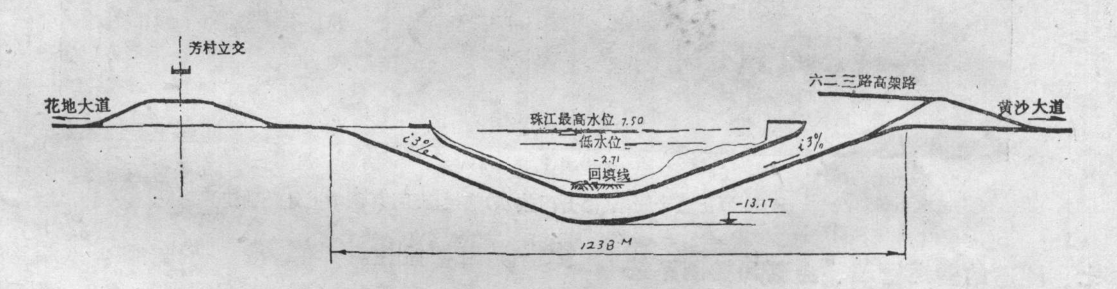
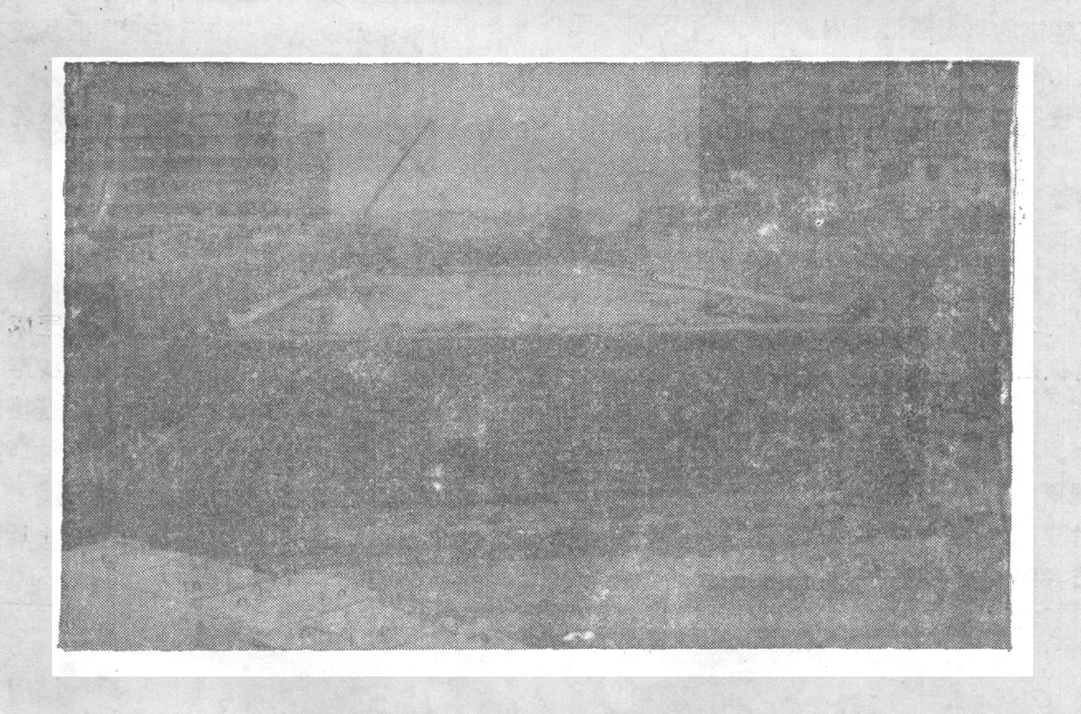
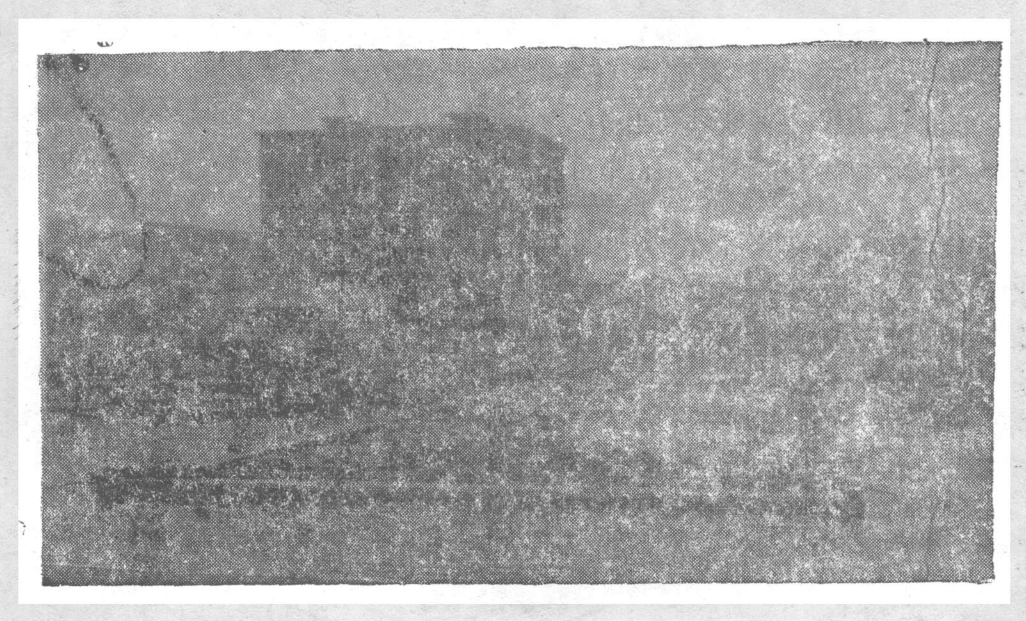


图6 珠江隧道纵剖面示意图


照片1 在干船坞内预制完成的E_1管节(图中远处是珠江)



照片2　E₁管节正从干船坞(已开门放水)拖运出江边(图中近处是珠江)

七、隧道的营运管理、监测和控制系统

为确保汽车隧道交通的安全、畅通，珠江隧道的汽车隧道管内设计配备了下述较现代化的设备和系统配套：（地铁隧管内的有关设备系统将由地铁工程全线统一考虑）

1.为隧道洞内外提供良好大气环境而必需的通风系统——采用630型的纵向喷气射流风机（Jet Fan），并配以必要的运行状态自动监控设备。

2.由于隧道洞内外亮度差别很大，要使司机在进入隧道时有较舒适的视觉感应环境是必需的，因此全隧道范围都要有良好的照明。珠江隧道采用高压钠灯带状连续光源，洞顶照明；并根据洞外环境亮度变化而需要对隧道内靠洞口附近一段范围照明度进行调节并配备有关的自动监控设备。

3.完善的交通讯号、引导信号和装置及其自动监控。

4.完善的供配电、排水设备，消防系统，以及配套的自动监控和自动报警。

5.紧急无线电话系统及有线广播系统。

6.闭路电视监控系统。

7.中央计算机及中央监控室管理系统。

8.完善的收费系统。

9.交通拯救援助车队。

八、工程进展及完工日期

珠江隧道目前(1992年7月底)已完成了E_1及E_2两节沉管节的预制工作；黄沙岸暗埋段隧管结构已完成约160m；河中基槽部份正在抓紧水下基岩爆破和清挖。预计1992年10月可进行E_1管节的沉放作业。

根据市政府的要求，珠江隧道将于1993年9月底开通。